

Расчетно-экспериментальное определение параметров модели упрочнения материалов Купера — Саймондса для металлических балок

© А.В. Шмелев, А.В. Омелюсик, В.И. Ивченко, С.В. Хитриков

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, 220072, Беларусь

Предложена методика расчетно-экспериментального определения параметров модели материала Купера — Саймондса стальных балочных конструкций при ударных нагрузках на основе метода конечных элементов. Натурный эксперимент выполнен на разработанной и изготовленной установке, реализующей динамическое ударное нагружение металлических балок по схеме трехточечного изгиба. Приведены результаты практической апробации предлагаемой методики на примере определения параметров модели Купера — Саймондса для балок из стали 20. Отличие расчетных от экспериментальных значений остаточного прогиба балки не превысило 5%. Компьютерное моделирование эксперимента проводилось в программном комплексе ANSYS LS-DYNA. Приведенные методические подходы предлагается использовать при расчетной оценке прочности силовой структуры пассажирских транспортных средств на соответствие требованиям Правил ООН № 66.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, метод конечных элементов, скорость деформации, динамическое упрочнение, краш-тест, модель Купера — Саймондса, металлическая балка, сталь 20, ANSYS LS-DYNA

Введение. В целях обеспечения безопасности людей разработчики транспортных средств при проектировании учитывают аварийные режимы работы конструкций. Для этого проводятся специальные краш-тесты по оценке соответствия силовых систем транспортных средств требованиям безопасности [1, 2]. Благодаря активному развитию методов и средств численного анализа получает распространение компьютерное моделирование краш-тестов (виртуальные испытания). Это позволяет на стадии проектирования определить наиболее эффективные конструктивные решения, снизить длительность и стоимость экспериментальных исследований, а в отдельных случаях и исключить их. Некоторые нормативные требования, например, Правила ООН № 66 [3] и Правила ООН № 29 [4], устанавливающие соответственно требования к безопасности силовой структуры пассажирских транспортных средств и кабин грузовых автомобилей, позволяют заменить эксперимент расчетами при обеспечении достоверности таких вычислений. Последнее может достигаться путем применения комплекса средств и методов моделирования, которые должны учитывать все основные физические явления и эффекты, имеющие место в реальных процессах. Одним из таких значимых для учета эффектов является зависимость прочностных характеристик

конструкционных сталей от скорости пластического деформирования. Например, для ферритной нержавеющей стали X2CrNi12 изменение скорости пластического деформирования с 0 до 40 с^{-1} приводит к увеличению предела текучести с 250 до 390 МПа [2].

По причине широкого разнообразия возможных аварийных режимов нагружения конструкций имеет место существенная вариация максимальных значений скоростей пластического деформирования их силовых элементов. В литературе выделяют три основных диапазона таких значений скоростей пластического деформирования:

$$\begin{aligned} 10^{-5} \dots 10^{-1} \text{ с}^{-1} & \text{ — низкие;} \\ 10^{-1} \dots 10^2 \text{ с}^{-1} & \text{ — средние;} \\ 10^2 \dots 10^4 \text{ с}^{-1} & \text{ — высокие.} \end{aligned}$$

Наиболее нагруженные силовые элементы конструкций транспортных средств, испытывающие аварийное динамическое нагружение, например при краш-тестах по [3], характеризуются скоростями пластического деформирования, относящимися к среднему диапазону [2].

В данном контексте рассмотрим режимы аварийного нагружения силовой структуры пассажирского транспортного средства с балочной несущей системой при опрокидывании [3]. Основными несущими элементами силовых структур пассажирских транспортных средств являются металлические балки различных типоразмеров и профилей. Данные элементы воспринимают основную часть динамической нагрузки при аварийных режимах нагружения и при опрокидывании. Широкое распространение при изготовлении балочных элементов каркасов автобусов получила сталь 20 благодаря относительно высокой прочности, пластичности и технологичности.

В [5–9] выполнялась расчетная оценка прочности силовой структуры автобусов на соответствие требованиям, приведенным в [3], с определением свойств материалов конструкции, однако без учета эффектов динамического упрочнения материала, возникающих при ударных нагрузках.

При моделировании и расчетах конструкций для их материалов используются различные модели описания поведения, позволяющие учитывать необходимые эффекты путем определения и задания соответствующих параметров. В связи с относительно небольшим количеством параметров и достаточно высоким уровнем достоверности описания реальных свойств материалов широкое распространение, в частности для металлов, получила модель упрочнения материала Купера — Саймондса [10–13]:

$$\sigma_{\text{T}}^{\text{д}} = \sigma_{\text{T}} \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right],$$

где σ_T^d — динамический предел текучести материала; σ_T — статический предел текучести материала; $\dot{\epsilon}$ — скорость пластического деформирования материала; C, p — параметры модели упрочнения материала Купера — Саймондса.

Известен ряд методов и алгоритмов по определению параметров модели материала Купера — Саймондса: тест Тейлора [14], массивы Тагучи [15], использование программы SAS JMP 10.0 для построения функции Гаусса [16], применение метода масштабирования, основанного на экспоненциальных и линейных функциях [17]. Скорость пластической деформации материалов в указанных исследованиях варьировалась от 10^{-1} до 10^6 с $^{-1}$. Следует отметить сложность, а в отдельных случаях и невозможность реализации приведенных методов и алгоритмов при решении прикладных задач, а также необходимость в проведении большого количества экспериментов для определения параметров моделей упрочнения материалов, что ограничивает их применение.

В связи с этим цель настоящей статьи — описать разработанную методику определения параметров модели упрочнения металлов Купера — Саймондса при скоростях пластического деформирования $10^{-1} \dots 10^2$ с $^{-1}$ с возможностью дальнейшего использования полученных характеристик для компьютерного моделирования процесса испытаний стальных балочных конструкций транспортных средств при расчетной оценке соответствия требованиям [3]. Для того чтобы успешно применять разрабатываемые методические рекомендации на практике, они должны обеспечивать относительную простоту проведения исследований, реализовываться на доступных для использования оборудовании и аппаратуре.

Оборудование и средства измерения для экспериментальных исследований. Преобладающим видом нагружения балочных элементов силовой структуры пассажирских транспортных средств при испытаниях на прочность является изгиб с прогрессирующим пластическим деформированием, вызывающим потерю формы сечения и образование пластического шарнира. Поэтому предлагаемая методика расчетно-экспериментального определения параметров модели материала Купера — Саймондса основана непосредственно на анализе результатов деформирования металлических балок при трехточечном изгибе под воздействием ударного нагружения. Таким образом, в результате исследования будут уточнены механические свойства металлических балок при работе в условиях динамического ударного нагружения с учетом влияния на их свойства технологий производства. Для выполнения экспериментальных исследований была разработана и изготовлена испытательная установка, общий вид которой представлен на рис. 1.

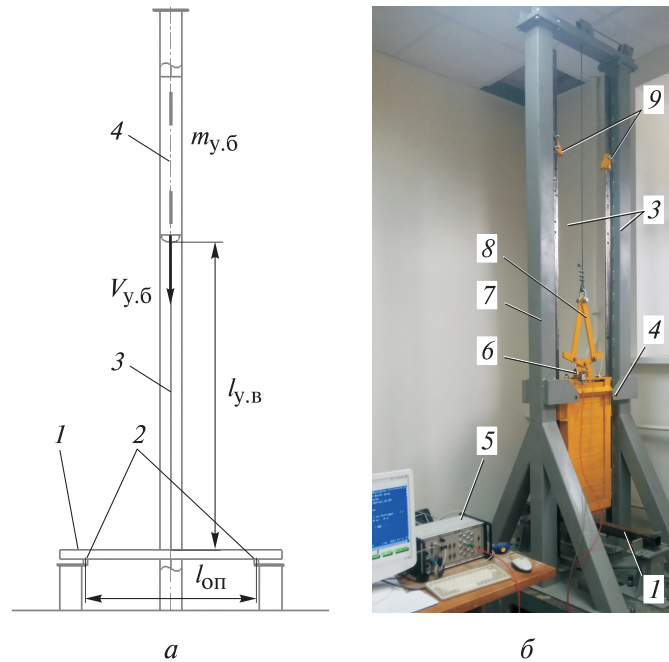


Рис. 1. Схема (а) и фотография (б) испытательной установки:

1 — образец; 2 — опоры; 3 — направляющие (ближняя не отображена); 4 — ударный блок; 5 — регистрирующая аппаратура; 6 — датчик ускорений; 7 — рама стенда; 8 — захват; 9 — упоры

На испытуемую металлическую балку воздействует ударный блок массой $m_{y.б}$, кг, движущийся со скоростью $V_{y.б}$, м/с (рис. 1, а). Таким образом, ударный блок воздействует на балку с энергией, Дж:

$$E_{y.б} = \frac{m_{y.б} V_{y.б}^2}{2}.$$

Расчетная скорость $V_{y.б}$ зависит от высоты падения груза и определяется по формуле

$$V_{y.б} = \sqrt{2gl_{y.в}},$$

где g — ускорение свободного падения, м/с²; $l_{y.в}$ — ударная высота (расстояние от нижней кромки бойка ударного блока до верхней поверхности балки), м (см. рис. 1, а).

Предусмотренная конструкцией установки возможность регулировать массу ударного блока и высоту его сбрасывания позволяет обеспечить требуемые значения энергии ударного блока и скорости его удара для достижения необходимой величины упругопластической деформации балки.

Более высокая чистота проведения эксперимента по определению показателей изгибного динамического нагружения образцов балок по сравнению, например, с опрокидыванием отдельной секции силовой структуры автобуса [2, 6] является преимуществом способа исследований с применением приведенного испытательного стенда. Это достигается возможностью гибкого управления параметрами процесса ударного нагружения испытуемого образца, включая стабильность расположения зон и характера приложения нагрузки. В совокупности это обеспечивает высокую воспроизводимость проводимых испытаний и стабильность получения данных с помощью стандартной измерительной аппаратуры. Подобный подход к проведению испытаний рассматривается в [2].

Технические характеристики испытательной установки представлены ниже:

Масса ударного блока $m_{y.б}$, кг	24–150 (изменяется кратно 1,5 кг)
Ударная высота $l_{y.в}$, м	0–1,43 (наличие пяти ступеней с интервалом 0,2 м)
Расстояние между опорами под образцом $l_{оп}$, м	0,17–1

Скорость ударного блока в момент столкновения с образцом определяется по результатам интегрирования процесса изменения вертикального ускорения ударного блока, измеряемого датчиком ускорений Testo 435-4 и регистрируемого системой CORRSYS-DATRON деер-10. Диапазон измерения ускорений с точностью $0,01 \text{ м/с}^2$ составляет $\pm 2g$. Интегрирование процесса изменения вертикального ускорения выполняется в приложении LS-PrePost.

С учетом применения непрямого способа измерения скорости ударного блока $V_{y.б}$ для оценки точности определяемого значения скорости были проведены измерения одновременно с помощью высокоскоростной камеры Photron FASTCAM SA-Z и датчика ускорений Testo 435-4. На рис. 2 показана испытательная установка для измерения скорости ударного блока.

При измерениях задавали максимальные значения массы ударного блока $m_{y.б}$ и ударной высоты $l_{y.в}$.

В качестве измерительных средств при применении метода видеофиксации процесса выступали: контрольная шкала с черно-белой разметкой с шагом 10 мм, зафиксированная на ударном блоке; стрелочный указатель, установленный на силовой раме стенда и описанная выше высокоскоростная камера. По результатам съемки определялось время перемещения участка разметки шкалы относительно стрелочного указателя непосредственно перед ударным взаимодействием. Съемка проводилась с частотой 10 000 кадров/с. На рис. 3 показаны фрагменты кинограммы ударного взаимодействия.

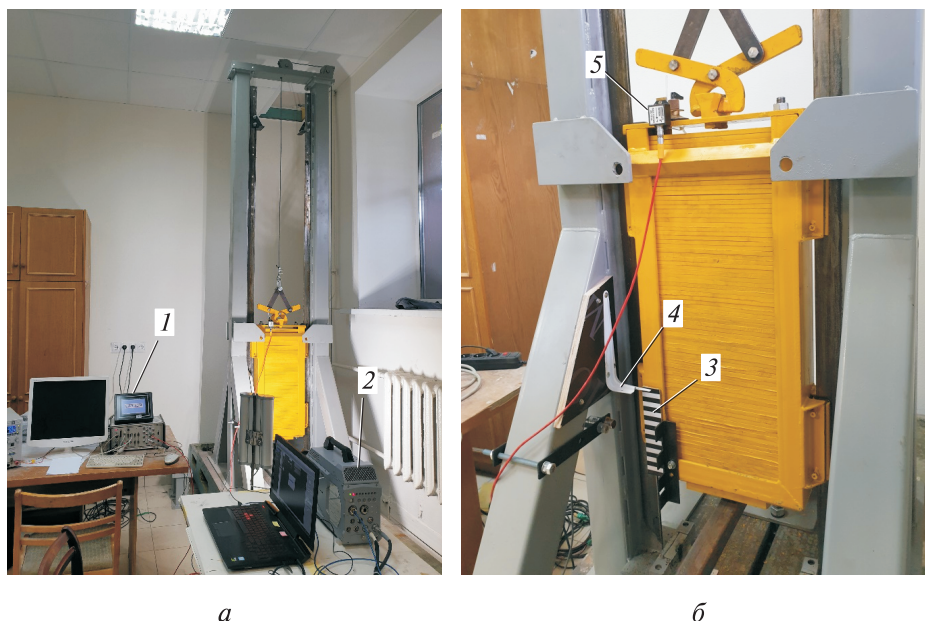


Рис. 2. Испытательная установка с аппаратурой для измерения скорости ударного блока:

1 — регистрирующая аппаратура; 2 — высокоскоростная камера; 3 — контрольная шкала; 4 — стрелочный указатель; 5 — датчик ускорений

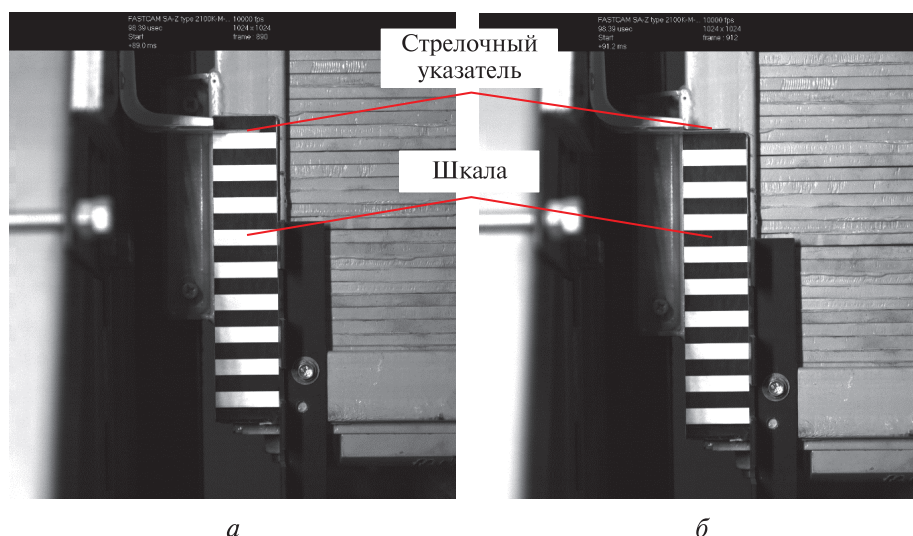


Рис. 3. Фрагменты кинограммы перемещения участка контрольной шкалы относительно стрелочного указателя:

а — начало; б — окончание перемещения

Скорость ударного блока в момент столкновения с образцом балки определялась путем деления длины единичного участка шкалы на время перемещения, полученное в ходе анализа цифровых изображений кинограммы.

По итогам трех экспериментов получены значения скорости ударного блока для обоих рассматриваемых способов измерений. Отличие полученных значений скоростей составило 2,6 %, что соответствует отличию расчетных величин энергии удара в 5,3 %. Таким образом, способ измерения скорости ударного блока с использованием датчика ускорений Testo 435-4 можно считать приемлемым.

Расчетно-экспериментальное определение параметров модели материала Купера — Саймондса для стальных балок. Разработанная методика расчетно-экспериментального определения параметров модели материала Купера — Саймондса для металлических балок замкнутого сечения с использованием описанной выше испытательной установки включает три основных этапа:

1) предварительное компьютерное моделирование стендовых испытаний;

2) натурные стендовые испытания;

3) определение параметров модели материала;

Рассмотрим особенности выполнения каждого этапа.

На первом этапе определяются параметры настроек испытательной установки для натурального эксперимента. К указанным параметрам относятся масса ударного блока $m_{у.б}$, ударная высота $l_{у.в}$, расстояние между опорами под образцом $l_{оп}$. Их сочетание должно обеспечивать прогиб образца балки на стенде в диапазоне 100...150 мм для достижения необходимой деформации образца с образованием пластического шарнира и исключения избыточных деформаций балки, приводящих к недопустимому контакту с опорной поверхностью.

При моделировании используются значения параметров C и p модели материала Купера — Саймондса, взятые из доступных источников для исследуемой марки стали, либо материала-аналога. Базовые параметры модели упругопластического поведения материала рекомендуется принимать по результатам испытаний его образцов с учетом эффекта упрочнения материала в углах труб [18].

На втором этапе определяются экспериментальные значения остаточного прогиба образцов балок. Испытания проводятся для группы образцов одного типоразмера из одного материала при одинаковых исходных параметрах установки. При проведении испытаний рекомендуется использовать не менее трех образцов балок. Каждому образцу присваивается порядковый номер с соответствующей маркировкой. Измеряются их основные размеры (ширина, высота, толщина стенок и т. п.) с целью проверки соответствия нормативным требованиям (ТУ, ГОСТ и др.).

В ходе эксперимента регистрируются показания вертикального ускорения ударного блока, после чего путем интегрирования полученной зависимости вертикального ускорения от времени определяется скорость ударного блока в момент столкновения с образцом.

По результатам эксперимента определяется среднее значение остаточного прогиба образцов балок.

На третьем этапе определяются искомые параметры модели материала Купера — Саймондса с использованием измеренного на втором этапе значения скорости ударного блока в момент столкновения с образцом балки. Проводятся компьютерное моделирование стеновых испытаний с определением значения остаточного прогиба балки и его сравнение с полученным в ходе натурного эксперимента средним значением прогиба P_3 . При разнице в указанных значениях прогибов более 5 % выполняется корректировка параметров C и p модели упрочнения материала Купера — Саймондса, заданных в расчетной модели. На рис. 4 представлена блок-схема последовательности определения параметров модели материала Купера — Саймондса, где $P_p(C, p)$ — расчетное значение остаточного прогиба балки, получаемое по результатам изменения параметров модели материала C и p ; ΔC и Δp — шаг изменения параметров модели; δ — погрешность определения расчетного значения остаточного прогиба относительно среднего экспериментального значения.

Приведенный алгоритм составлен исходя из того, что скорость пластического деформирования материала $\dot{\epsilon}$ на начальном этапе неизвестна. Поэтому с целью минимизации числа итераций поиска значений параметров C и p указанный алгоритм сначала реализует определение параметра C , а затем p .

Для удобства дальнейшего использования обработки результатов и сокращения количества итераций рекомендуется изменять параметр C с шагом $\Delta C = 5 \text{ с}^{-1}$, а параметр p с шагом $\Delta p = 0,2$. Если при достижении минимального отклонения оказалось два возможных значения одного из параметров, т. е. расчетный остаточный прогиб P_p больше экспериментального для одного значения и меньше для другого при одинаковой погрешности δ , то преимущество отдается значению с остаточным прогибом больше экспериментального из соображений обеспечения запаса прочности при дальнейших расчетах.

После каждого изменения одного из параметров выполняются расчет и фиксация значений остаточного прогиба образца балки $P_p(C, p)$. Изменение проводится до тех пор, пока не будет достигнута минимальная погрешность расчета δ , не превышающая 5 %. Если полученная минимальная погрешность δ при принятых шагах изменения параметров C и p больше 5 %, следует уменьшить шаг изменения параметра p в 2 раза и провести дополнительные расчеты. Причем такие расчеты осуществляются для этапа вычислений, соответствующего минимальной разнице расчетного и экспериментального прогиба балки при значении параметра p , достигнутого на предыдущей стадии вычислений.

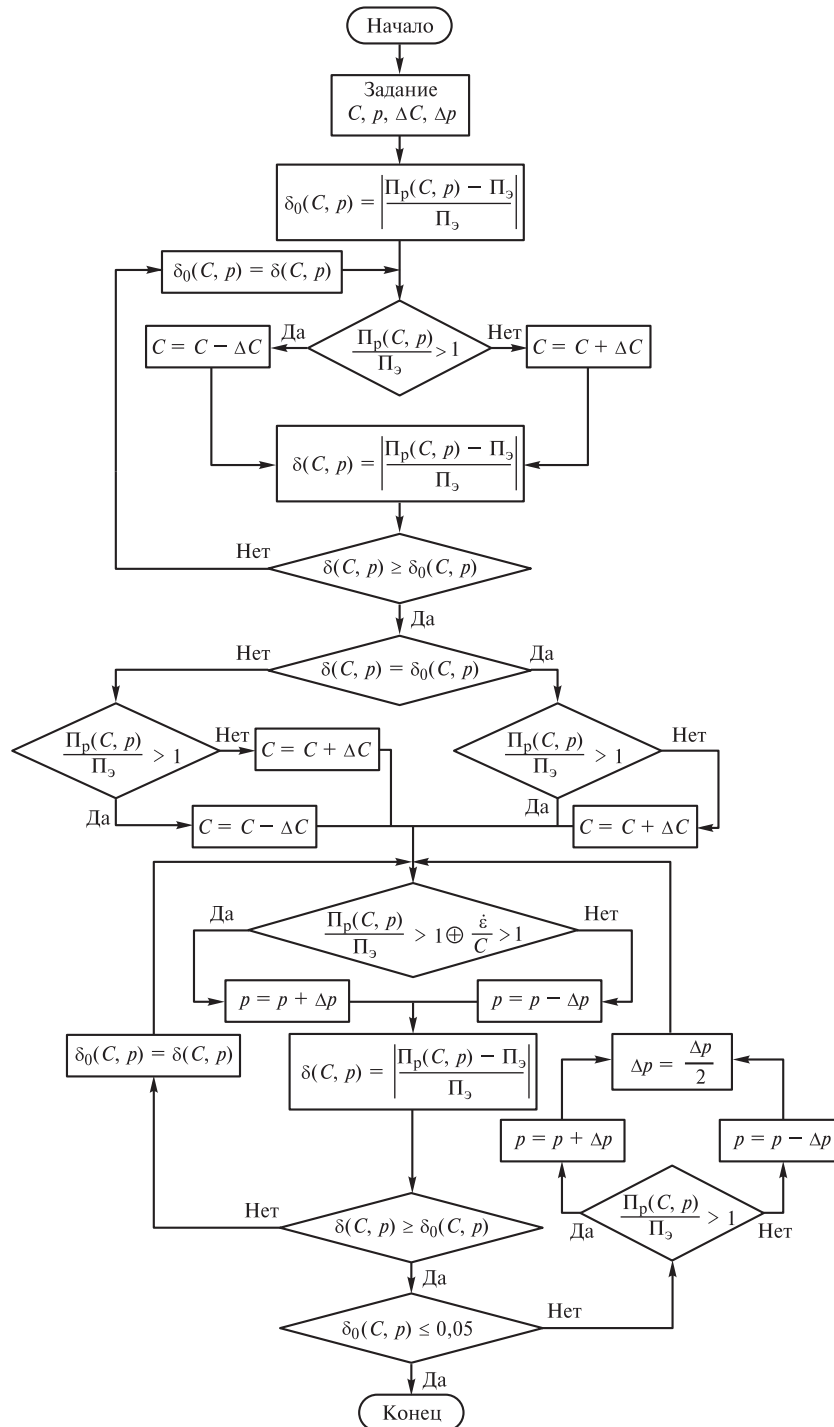


Рис. 4. Блок-схема определения фактических параметров модели материала Купера — Саймондса

Апробация предлагаемой процедуры расчетно-экспериментального определения параметров динамического упрочнения материалов. Определение значений параметров настройки экспериментальной установки выполнялось путем предварительного компьютерного моделирования испытаний в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS LS-DYNA. Моделировались испытания образцов стальных балок с сечением $40 \times 40 \times 2$ мм (ГОСТ 13663) из стали 20 длиной 1,3 м. На рис. 5 представлена конечно-элементная модель образца балки с деталями конструкции испытательной установки, непосредственно взаимодействующими с балкой.

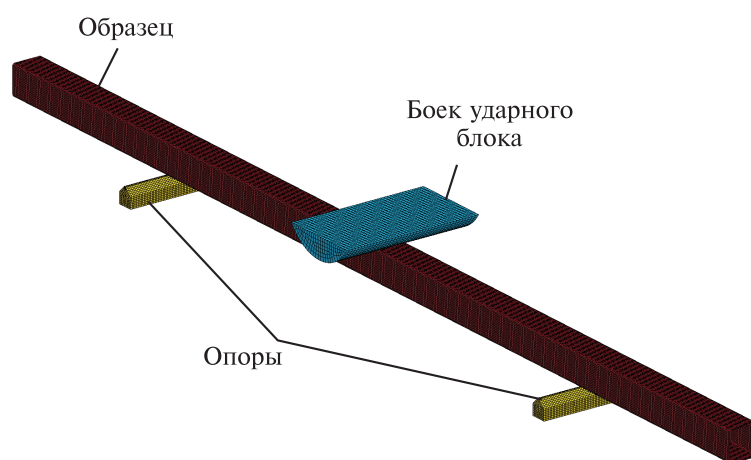


Рис. 5. Конечно-элементная модель образца балки с деталями конструкции испытательной установки

При разработке модели длина стороны конечных элементов модели балки задавалась равной 2 мм, что обеспечило наличие трех элементов на скруглениях по контуру углов. Такая схема разбивки была определена ранее на основе результатов проведенных исследований влияния размеров конечных элементов на результаты расчетов [19].

При задании значений параметров модели стали 20, соответствующих статическим характеристикам прочности, использовались значения, идентифицированные по результатам испытаний образцов материалов [18] с учетом эффекта упрочнения материала в углах труб. Предварительные значения параметров модели Купера — Саймондса, описывающие динамическое упрочнение материала, были взяты из результатов испытаний материала-аналога стали 20 — стали AISI 1018: $C = 40 \text{ с}^{-1}$ и $p = 5$ [14].

В ходе предварительного компьютерного моделирования начальная скорость бойка ударного блока задавалась с помощью карты INITIAL_VELOCITY_GENERATION. Значение скорости получено по расчетным данным для выбранной высоты расположения ударно-

го блока. Опорам под образцом и бойку ударного блока задавались свойства абсолютно жесткого тела. Между деталями был задан коэффициент трения 0,1. Расчеты величины деформирования образца балки осуществлялись с варьированием параметров настроек испытательного стенда до достижения рекомендуемого остаточного прогиба в диапазоне 100...150 мм.

По итогам предварительного компьютерного моделирования испытаний были получены следующие исходные параметры настройки испытательной установки: ударная высота $l_{y.в} = 1,19$ м, масса ударного блока $m_{y.б} = 102$ кг, расстояние между опорами образца $l_{оп} = 0,75$ м. При этом расчетный остаточный прогиб балки составил 145 мм.

Экспериментальные исследования были выполнены для трех образцов. Определение остаточного прогиба образцов балок осуществлялось с помощью штангенрейсмаса. Результаты испытаний образца 1 были исключены из рассмотрения после выявления значительного отклонения его остаточного прогиба относительно образцов 2 и 3, возникшего в результате разрушения, вызванного скрытым дефектом металла балки. По итогам испытаний были получены зависимости вертикального ускорения ударного блока от времени. При их интегрировании в приложении пре-/постпроцессора LS-PrePost была определена скорость ударного блока в момент столкновения с образцом, которая составила 4,46 м/с.

С использованием данных натурального эксперимента согласно алгоритму, приведенному на рис. 4, выполнен итерационный поиск фактических параметров модели материала. Расчетное значение остаточного прогиба балки $P_p(40, 5)$ оказалось ниже среднего экспериментального значения $P_э$, поэтому параметр C с шагом $\Delta C = 5 \text{ с}^{-1}$ изменялся в сторону увеличения. При достижении наименьшего отклонения от эксперимента при $C = 115 \text{ с}^{-1}$ изменялся параметр p . Поскольку при фиксированном параметре $C = 115 \text{ с}^{-1}$ остаточный расчетный прогиб образца балки больше экспериментального значения, а соотношение скорости пластического деформирования $\dot{\epsilon}$ к параметру C из второго слагаемого уравнения Купера — Саймондса меньше 1, параметр p изменялся начиная со значения 5 с шагом $\Delta p = 0,2$ в сторону увеличения. После каждой итерации проводился повторный расчет остаточного прогиба P_p . Так как изменение параметра p привело к увеличению погрешности δ , было принято первоначальное значение, равное 5. При этом минимальная погрешность расчета остаточного прогиба P_p при принятых шагах изменения параметров C и p не превысила 5 % и составила 0,6 %.

Таким образом, итоговые значения параметров модели упрочнения материала Купера — Саймондса для балки сечением $40 \times 40 \times 2$ мм (ГОСТ 13663) из стали 20 составили $C = 115 \text{ с}^{-1}$, $p = 5$.

Компьютерное моделирование испытаний балки, проведенное без учета эффекта упрочнения от скорости пластического деформирования материала, показало существенное увеличение (до 2,9 раз) расчетного остаточного прогиба балки по сравнению с экспериментальным значением, что указывает на важность учета этого эффекта.

Внешний вид образцов балок после натурального эксперимента и его компьютерного моделирования с использованием вычисленных коэффициентов модели упрочнения материала Купера — Саймондса представлен на рис. 6.

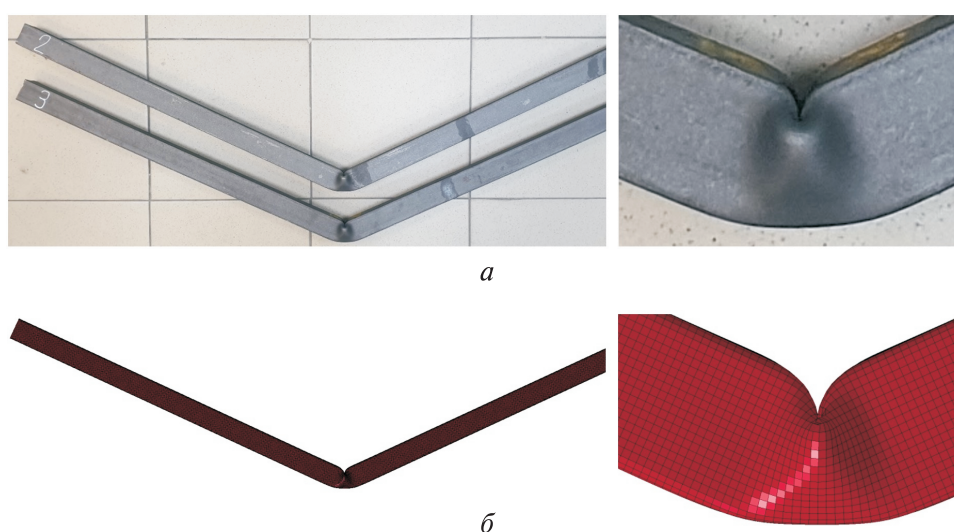


Рис. 6. Внешний вид образцов балок после испытаний в результате эксперимента (а) и расчета (б)

Результаты эксперимента и расчета образцов балок

Номер образца	Остаточный прогиб образцов, мм		Погрешность, %
	Эксперимент	Расчет	
2	167	165	1,2
3	161		2,5
Среднее значение	164		0,6

Для сопоставления в таблице представлены результаты экспериментальных исследований и расчета.

Скорость пластического деформирования материала испытываемых образцов балок оказывает существенное влияние на показатели их прочности. Приложение пре-/постпроцессор LS-PrePost позволяет определить показатели пластической деформации для конечных элементов модели балки с течением времени. Для определения макси-

мальных значений скорости пластического деформирования используются наиболее нагруженные элементы модели. На рис. 7 представлены расположение и номера выбранных для оценки конечных элементов расчетной модели балки.

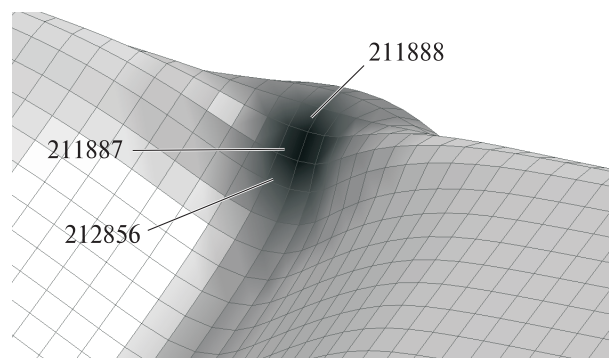


Рис. 7. Конечные элементы модели балки с наибольшими значениями пластической деформации (зона формирования пластического шарнира)

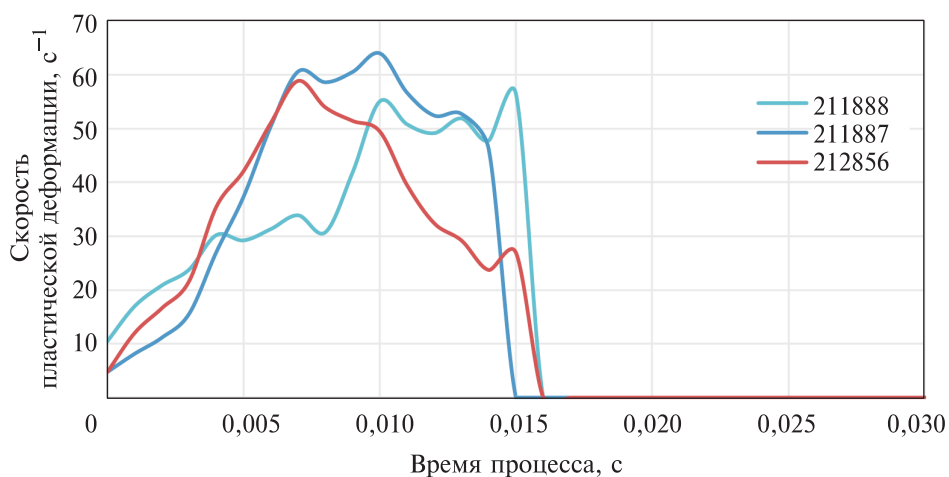


Рис. 8. Зависимость скорости пластического деформирования в рассматриваемых конечных элементах от времени процесса

Полученные зависимости изменения пластического деформирования от времени были проинтегрированы в приложении LS-PrePost. Результаты в виде графиков изменения скорости пластического деформирования представлены на рис. 8 (номер зависимости соответствует номеру конечного элемента на рис. 7).

Максимальные значения скорости пластической деформации материала образцов балок достигают диапазона значений $50...70 \text{ с}^{-1}$ (см. рис. 8). Это подтверждает соответствие условий динамического

нагружения испытуемых образцов на представленном стенде реальным условиям аварийного нагружения транспортных средств, так как значения скоростей деформирования металла образцов балок попадают в диапазон скоростей $10^{-1} \dots 10^2 \text{ с}^{-1}$, характерных для краш-тестов силовых конструкций транспортных средств [2].

Заключение. Актуальность настоящей работы заключается в разработке и апробации методов определения параметров модели упрочнения металлов Купера — Саймондса при скоростях деформирования $10^{-1} \dots 10^2 \text{ с}^{-1}$, характерных для материала силовой структуры пассажирских транспортных средств при динамических испытаниях на соответствие требованиям [3]. При разработке акцент сделан на относительно простые расчетно-экспериментальные процедуры, для проведения которых требуется относительно небольшое количество экспериментов при обеспечении достаточного для инженерного применения уровня точности.

Для определения параметров C и p модели упрочнения материалов Купера — Саймондса предложена расчетно-экспериментальная методика, включающая расчетные предварительные исследования на основе компьютерного моделирования эксперимента, динамические ударные испытания образцов металлических балок при трехточечном изгибе и определение параметров C и p путем итерационных расчетов. Разработана и изготовлена специальная стендовая установка, позволяющая выполнять контролируемое ударное нагружение металлических балок для обеспечения необходимой энергии воздействия для проведения динамических ударных испытаний. Проведены контрольные испытания с применением высокоскоростной камеры и системы измерения перегрузок для оценки точности измерения скорости ударного воздействия на образцы балок. Результаты показали различие полученных значений скоростей в 2,6 %.

Сопоставление результатов расчетов, проведенных с использованием вычисленных параметров модели материала Купера — Саймондса для стали 20, и натурных испытаний показало удовлетворительную сходимость. Расчетная оценка выполнена с использованием программного комплекса конечно-элементного анализа ANSYS LS-DYNA. Полученные значения параметров модели материала Купера — Саймондса для балки сечением $40 \times 40 \times 2 \text{ мм}$ (ГОСТ 13663) из стали 20 составили $C = 115 \text{ с}^{-1}$ и $p = 5$. Погрешность по значению вертикального остаточного прогиба образца не превысила 5 %.

Приведенные методические подходы к определению параметров модели материала Купера — Саймондса предлагается использовать при расчетных исследованиях прочности силовой структуры пассажирских транспортных средств на соответствие требованиям [3].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Волошенко-Климовицкий Ю.Я. *Динамический предел текучести*. Москва, Наука, 1965, 179 с.
- [2] Vincze-Pap S., Csiszár A. Applied Virtual Technology (VT) on Bus Superstructure Roll-Over Tests. In: Jármái K., Farkas J. (eds) *Design, Fabrication and Economy of Metal Structures*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 551–560. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36691-8_83
- [3] *Правила ЕЭК ООН №66 (02) / Пересмотр 1. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения крупногабаритных пассажирских транспортных средств в отношении прочности их силовой структуры*. Минск, БелГИСС, 2006, 74 с.
- [4] *Правила ЕЭК ООН № 29 (02) / Пересмотр 2. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении защиты лиц, находящихся в кабине грузового транспортного средства*. Минск, БелГИСС, 2015, 29 с.
- [5] Elitok K., Guler M.A., Bayram B., Stelzmann U. An Investigation on the Roll-Over Crashworthiness of an Intercity Coach, Influence of Seat Structure and Passenger Weight. *9th International LS-DYNA Conference*. Dearborn, Michigan USA, 2006, pp. 17–30.
- [6] Рогов П.С. *Разработка методики обеспечения пассивной безопасности кузовов автобусов в условиях опрокидывания при проектировании*. Дис. ... канд. тех. наук. Нижний Новгород, 2015, 189 с.
- [7] Вашурин А.С. *Разработка методики и оценка пассивной безопасности кузовов из многослойных панелей вахтовых автобусов*. Дис. ... канд. тех. наук. Нижний Новгород, 2014, 260 с.
- [8] Pavlata P. Virtual Simulations of Bus Approval Tests according to European Standards. *MSC Software 2005 Virtual Product Development Conference*, 2005.
- [9] Kaptanoğlu M., Kucuk O. Rollover crashworthiness of a multipurpose coach. *7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi — OTEKON 2014*. Bursa, Turkey, 26–27 May, 2014. URL: https://www.hexagonstudio.com.tr/wp-content/uploads/2019/03/rollover_crashworthiness_of_a_multipurpose_coach.pdf/ (дата обращения 10.08.2019).
- [10] Садырин А.И. *Компьютерные модели динамического разрушения конструкционных материалов*. Нижний Новгород, Нижегородский госуниверситет, 2010, 35 с.
- [11] John O. *LS-DYNA theory manual*, 2006. URL: <http://ftp.ecn.purdue.edu> (дата обращения 10.08.2018).
- [12] Нихамкин М.Ш., Воронов Л.В., Любчик О.Л., Гладкий И.Л. Экспериментальная верификация моделей деформационного поведения и высокоскоростного разрушения титанового сплава ВТ6. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2011, т. 13, № 4 (4), с. 991–997.
- [13] Al Salahi A.A., Othman R. Constitutive Equations of Yield Stress Sensitivity to Strain Rate of Metals: A Comparative Study. *Journal of Engineering*, 2016, vol. 2016, pp. 1–7. DOI: 10.1155/2016/3279047
- [14] Hernandez C., Maranon A., Ashcroft I.A., Casas-Rodriguez J.P. A computational determination of the Cowper-Symonds parameters from a single Taylor test. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, vol. 37, pp. 4698–4708.
- [15] Škrlec A., Klemenc J. Estimating the Strain-Rate-Dependent Parameters of the Cowper-Symonds and Johnson-Cook Material Models using Taguchi Arrays. *Strojniški vestnik — Journal of Mechanical Engineering*, 2016, vol. 4 (62), pp. 220–230.

- [16] Marangoni A.L., Massaroppi Junior E. Cowper-Symonds parameters estimation for ABS material using design of experiments with finite element simulation. *Polimeros*, 2017, vol. 3 (27), pp. 220–224.
- [17] Hashemi S.K., Bradford M.A. The strain-rate effects on the numerical simulation of steel beams under blast loads. *WIT Transactions on the Built Environment*, 2014, vol. 141, pp. 311–321.
- [18] Омелюсик А.В., Шмелев А.В., Кононов А.Г., Рубцов А.В. Определение параметров полилинейной модели материала и моделирование пластического деформирования балочных конструкций машин. *Механика машин, механизмов и материалов*, 2017, № 2, с. 19–27.
- [19] Шмелев А.В., Омелюсик А.В., Ивченко В.И., Хитриков С.В. Компьютерное моделирование процессов деформирования металлических балок при динамическом ударном нагружении. *Сборник научных трудов: Актуальные вопросы машиноведения*, 2020, вып. 9, с. 111–116.

Статья поступила в редакцию 17.05.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Шмелев А.В., Омелюсик А.В., Ивченко В.И., Хитриков С.В. Расчетно-экспериментальное определение параметров модели упрочнения материалов Купера — Саймондса для металлических балок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-5-2077>

Шмелев Алексей Васильевич — канд. техн. наук, заместитель генерального директора по научной работе, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. e-mail: shmeliov.alexei@gmail.com

Омелюсик Алексей Валерьевич — младший научный сотрудник Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. e-mail: alexlifting@mail.ru

Ивченко Вадим Иванович — заместитель начальника Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. e-mail: ivchenkovad@mail.ru
SPIN-code: 2639-6637; *ORCID*: 0000-0002-1146-5343

Хитриков Сергей Владимирович — заместитель начальника отдела Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. e-mail: hitrikovsergey@gmail.com

Computational and experimental determination of the parameters of the Cowper — Symonds hardening materials model for metal beams

© A.V. Shmialiou, A.V. Amialiusik, V.I. Ivchenko, S.V. Hitrikov

The Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus,
Minsk, 220072, Belarus

The study introduces a method for the computational and experimental determination of the parameters of the Cowper — Symonds material model for steel beam structures under shock loads, the method being based on the finite element method. A full-scale experiment was carried out on a developed and manufactured installation that implements dynamic shock loading of metal beams according to the three-point bending scheme. The results of the practical approbation of the proposed method are presented on the example of determining the parameters of the Cowper — Symonds model for beams of steel 20. The difference between the calculated and experimental values of the residual deflection of the beam did not exceed 5%. Computer simulation of the experiment was carried out in the ANSYS LS-DYNA software package. The above methodological approaches are proposed to be used in the calculated assessment of the strength of the power structure of passenger vehicles for compliance with the requirements of UN Regulation No. 66.

Keywords: computer simulation, finite element method, strain rate, dynamic hardening, crash test, Cowper — Symonds model, metal beam, steel 20, ANSYS LS-DYNA

REFERENCES

- [1] Voloshenko-Klimovitskiy Yu.Ya. *Dinamicheskiy predel tekuchesti* [Dynamic yield stress]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 179 p.
- [2] Vincze-Pap S., Csiszár A. Applied Virtual Technology (VT) on Bus Superstructure Roll-Over Tests. In: Jármái K., Farkas J. (eds) *Design, Fabrication and Economy of Metal Structures*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 551–560. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36691-8_83
- [3] *Pravila EEK OON №66 (02) / Peresmotr 1. Edinoobraznye predpisaniya, kassayushchiesya ofitsialnogo utverzhdeniya krupnogabaritnykh passazhirsikh transportnykh sredstv v otnoshenii prochnosti ikh silovoy struktury* [UNECE Regulation No. 66 (02) / Revision 1. Uniform provisions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to their structural strength]. Minsk, BelGISS Publ., 2006, 74 p.
- [4] *Pravila EEK OON № 29 (02) / Peresmotr 2. Edinoobraznye predpisaniya, kassayushchiesya ofitsialnogo utverzhdeniya transportnykh sredstv v otnoshenii zaschity lits, nakhodyaschikhsya v kabine gruzovogo transportnogo sredstva* [UNECE Regulation No. 29 (02) / Revision 2. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of persons in the cab of a commercial vehicle]. Minsk, BelGISS Publ., 2015, 29 p.
- [5] Elitok K., Guler M.A., Bayram B., Stelzmann U. An Investigation on the Roll-Over Crashworthiness of an Intercity Coach, Influence of Seat Structure and Passenger Weight. *9th International LS-DYNA Conference*. Dearborn, Michigan USA, 2006, pp. 17–30.
- [6] Rogov P.S. *Razrabotka metodiki obespecheniya passivnoy bezopasnosti kuzovov avtobusov v usloviyakh oprokidyvaniya pri proektirovanii*. Dis. ... kand. tekhn.

- nauk [Development of a methodology for ensuring passive safety of bus bodies under rollover conditions during design. Cand. eng. sc. diss.]. N. Novgorod, 2015, 189 p.
- [7] Vashurin A.S. *Razrabotka metodiki i otsenka passivnoy bezopasnosti kuzovov iz mnogosloynnykh paneley vakhrovyykh avtobusov*. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of methods and assessment of passive safety of bodies made of multi-layer panels of rotational buses. Cand. eng. sc. diss.] N. Novgorod, 2014, 260 p.
- [8] Pavlata P. Virtual Simulations of Bus Approval Tests according to European Standards. *MSC.Software 2005 Virtual Product Development Conference*, 2005.
- [9] Kaptanoğlu M., Kucuk O. Rollover crashworthiness of a multipurpose coach. *7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi – OTEKON 2014*. Bursa, Turkey, 26–27 May 2014. Available at: https://www.hexagonstudio.com.tr/wp-content/uploads/2019/03/rollover_crashworthiness_of_a_multipurpose_coach.pdf/ (accessed August 10, 2019).
- [10] Sadyrin A.I. *Kompyuternye modeli dinamicheskogo razrusheniya konstruksionnykh materialov* [Computer models of dynamic fracture of structural materials]. N. Novgorod, Nizhegorodskiy gosuniversitet Publ., 2010, 35 p.
- [11] John O. *LS-DYNA Theory Manual*, 2006. Available at: <http://ftp.ecn.purdue.edu> (accessed August 10, 2018).
- [12] Nikhamkin M.Sh., Voronov L.V., Lyubchik O.L., Gladkiy I.L. *Izvestiya Samar-skogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk — Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 13, no. 4 (4), pp. 991–997.
- [13] Al Salahi A.A., Othman R. Constitutive Equations of Yield Stress Sensitivity to Strain Rate of Metals: A Comparative Study. *Journal of Engineering*, 2016, pp. 1–7.
- [14] Hernandez C., Maranon A., Ashcroft I.A., Casas-Rodriguez J.P. A computational determination of the Cowper-Symonds parameters from a single Taylor test. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, vol. 37, pp. 4698–4708.
- [15] Škrlec A., Klemenc J. Estimating the Strain-Rate-Dependent Parameters of the Cowper-Symonds and Johnson-Cook Material Models using Taguchi Arrays. *Strojniški vestnik — Journal of Mechanical Engineering*, 2016, vol. 4 (62), pp. 220–230.
- [16] Marangoni A.L., Massaroppi Junior E. Cowper-Symonds parameters estimation for ABS material using design of experiments with finite element simulation. *Polimeros*, 2017, vol. 3 (27), pp. 220–224.
- [17] Hashemi S.K., Bradford M.A. The strain-rate effects on the numerical simulation of steel beams under blast loads. *WIT Transactions on the Built Environment*, 2014, vol. 141, pp. 311–321.
- [18] Amialiusik A.V., Shmialiou A.V., Kononov A.G., Rubtsov A.V. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov — Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2017, no. 2, pp. 19–27.
- [19] Shmialiou A.V., Amialiusik A.V., Ivchenko V.I., Khitrikov S.V. Kompyuternoe modelirovanie protsessov deformirovaniya metallicheskih balok pri dinamicheskoy udarnoy nagruzhennii [Computer simulation of deformation processes of metal beams under dynamic shock loading]. *Sbornik nauchnykh trudov: Aktualnye voprosy mashinovedeniya* [Collection of scientific papers: Actual problems of mechanical engineering]. 2020, iss. 9, pp. 111–116.

Shmialiou A.V., Cand. Sc. (Eng.), Deputy General Director for Research, the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus.
e-mail: shmeliov.alexei@gmail.com

Amialiusik A.V., Junior Research Fellow, Republican Computer Center for Mechanical Engineering, the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus.
e-mail: alexlifting@mail.ru

Ivchenko V.I., Deputy Head of the Republican Computer Center for Mechanical Engineering, the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus.
e-mail: ivchenkovad@mail.ru
SPIN-code: 2639-6637; *ORCID*: 0000-0002-1146-5343

Hitrikov S.V., Deputy Head of the Department of the Republican Computer Center for Mechanical Engineering, the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus. e-mail: hitrikovsergey@gmail.com